Vol.2016-CVIM-202 No.16
2016/5/12

一枚の画像から半径が同一である2つの実円物体の検出（2016年5月12日版）

溝上 尚輝[a)]　呉 海元[b)]　陳 謙　鈴木 一正[c)]

概要：本論文は，Two Circle Algorithm をベースとし，複雑な背景を含む一枚の画像から半径が同一である 2 つの実円物体を検出する方法について述べる．本論文では，広角度範囲の RANSAC による楕円フィティング法を提案し，楕円候補セットを求める．このセットに対して，提案する 3 つの制約関数を用いて評価する．選出された 2 つの円の楕円パラメータを用いることでカメラの外部パラメータを推定し，カメラを搭載するロボットの自己位置を推定する．

キーワード：ロボット，カメラキャリブレーション，楕円フィッティング，自己位置推定

Detection for circle-pair objects with same radius from a single image (version 2016/5/12)

Mizokami Naoki[a)]　WU Haiyuan[b)]　CHEN Qian　Suzuki Kazumasa[c)]

Abstract: This paper describe two real circular shaped objects having the same radius from an image with clutter background using "Two Circle Algorithm". We propose an unique method for detecting candidates of ellipses by using a fitting algorithm based on RANSAC in wide angle range. From the detected candidates, we select two ellipses that are the real image of the boundaries the two circular objects, and then use them to determine the extrinsic camera parameters and the 3D position of the two circular objects. This method can also applied to the mobile robots to determine the position of itself by monitoring the two circular objects in the environment.

1. はじめに

1.1 研究背景

近年，掃除ロボット [1](以下，ロボットと記す) の需要が増加しており，環境に対応して効率よく掃除できる技術が求められるようになってきた．環境に対応した制御を行うためには，ロボット周辺の環境マップを作成する必要があり，そのためにはロボットの自己位置を把握する必要がある．ロボットの自己位置推定を行うためには，カメラで撮影された空間内の物体と画像内の像の射影幾何関係を求める必要があり，そのためにカメラキャリブレーションという技術を用いる．

1.2 カメラキャリブレーション

カメラキャリブレーション [2][3] はカメラの内部パラメータ及び外部パラメータを求める技術である．

代表的なカメラキャリブレーションの手法としてはチェッカーパターン [4] が用いられる．チェッカーボードの正方形のコーナー点により，3 次元座標及びその 2 次元座標上の対応点を抽出できる．しかし画像から検出されたコーナーや，直線によるカメラキャリブレーションでは，必ずピクセル誤差が生じる．そのため，より精度の高いカメラパラメータを求めるためには膨大な数の画像を用意する必

1 情報処理学会
CVIM, Ibaraki, Osaka 101–0062, Japan
†1 現在，和歌山大学
Presently with Wakayama Uniersity
a) mizokami.naoki@g.wakayama-u.jp
b) wu.haiyuan@g.wakayama-u.jp
c) suzuki.kazumasa@g.wakayama-u.jp

ⓒ 2016 Information Processing Society of Japan

要がある．

そこで既存手法として，円パターンを用いてカメラキャリブレーションを行う Two Circle Algorithm[5] が提案されている．Two Circle Algorithm は平行平面内にある 2 つの円からカメラキャリブレーションを行うアルゴリズムである．画像上の 2 つの楕円パラメータから円を含む平面の法線ベクトルを一意に推定し，焦点距離及び外部パラメータを求める．この手法では，3 次元上の円物体は透視投影により画像上では楕円になるという関係を用いてカメラキャリブレーションを行う．円パターンを用いることでピクセル誤差の影響を減らし，より精度の高いカメラパラメータの推定が行える．また，楕円フィティング [6] を行うことで円物体の一部が隠れている状態であってもカメラパラメータの推定を行うことができる．

1.3 研究目的

画像上の楕円からカメラパラメータを正しく推定するためには，正しい楕円パラメータを求める必要がある．しかし，実円物体は複雑な背景の中に存在し，実円物体自身に厚みや模様がある．さらに，実画像には複数の平面に存在する円物体を含むため，平行平面内ににある 2 円の正しい楕円パラメータを選択することは困難である．

本研究では，実環境においても Two Circle Algorithm を適用し，正しいカメラパラメータを推定することを目的とする．図 1 のようにロボットに搭載したカメラによって撮影された画像には，壁や天井といった同一平面のシーンが多く，空調や照明といった同じ物体が多数含まれる．そこで本研究では，ロボットにカメラを搭載することを想定し，同一平面内にある半径が同一の 2 つの円物体 (以下，目標円物体と記す) を写した画像を用いて Two Circle Algorithm を適用する．まず上述の問題を解消するために，広角度範囲の RANSAC[7] による楕円フィティングを提案し，複数の楕円パラメータを推定する．次に推定された複数の楕円パラメータから本研究の仮定に基づいた，3 つの制約条件を定義する．制約条件により目標円物体の楕円パラメータを選択し，外部パラメータを推定する．

図 1 視点が低いカメラから撮影された画像

2. Two Circle Algorithm とその問題点

Two Circle Algorithm とは，3 次元上に存在する平行平面内の 2 つの円が写った 1 枚の画像から，カメラキャリブレーションを行う手法である．本章では，Two Circle Algorithm について概説し，その問題点を示す．

2.1 Two Circle Algorithm の基本概念

カメラの光学中心 O を原点とし，Z 軸を光軸とするカメラ座標系において，画像上に写る楕円は一般に式 (1) で表される．その 2 次形式はベクトルと行列を用いて式 (2) で表される．

$$Ax_e^2 + 2Bx_ey_e + Cy_e^2 + 2Dx_e + 2Ey_e + F = 0 \qquad (1)$$

$$\begin{pmatrix} x_e & y_e & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B & D \\ B & C & E \\ D & E & F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \qquad (2)$$

カメラの焦点距離を f とすると，画像平面は $Z = -f$ に存在するので，光学中心 O と画像平面に写る楕円を結ぶと，傾斜楕円錐を構成できる．

$Z = -f$ である画像平面上に存在する点は式 (3) で表される．k はスケール係数である．

$$\mathbf{P} = k \begin{pmatrix} x_e & y_e & -f \end{pmatrix}^T \qquad (3)$$

点 $\mathbf{P}$ が楕円上に存在するとき傾斜楕円錐は式 (4) で表される．

$$\mathbf{P}^T\mathbf{Q}\mathbf{P} = \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ -f \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} A & B & -\frac{D}{f} \\ B & C & -\frac{E}{f} \\ -\frac{D}{f} & -\frac{E}{f} & \frac{F}{f^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ -f \end{pmatrix} = 0 \qquad (4)$$

また，行列 $\mathbf{Q}$ は傾斜楕円錐における 2 次形式の方程式のパラメータにより構成され，式 (5) で表される．

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} A & B & -\frac{D}{f} \\ B & C & -\frac{E}{f} \\ -\frac{D}{f} & -\frac{E}{f} & \frac{F}{f^2} \end{pmatrix} \qquad (5)$$

次に，光学中心 O と 3 次元上の円物体を結ぶと，傾斜円錐を構成できる．

$Z = z_0$ である 3 次元平面内に存在する点は式 (6) で表される．また，3 次元平面の円上に存在する点は式 (7) で表される．

$$\mathbf{P_c} = \begin{pmatrix} x_c & y_c & z_0 \end{pmatrix}^T \qquad (6)$$

$$\begin{cases} (x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 = r^2 \\ z = z_o \end{cases} \qquad (7)$$

ここで $\begin{pmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \end{pmatrix}$ は円の中心，r は半径をそれぞれ表す．式 (7) より，傾斜円錐の 2 次形式は式 (8) で表される．行列 $\mathbf{Q_c}$ は傾斜円錐のパラメータにより構成され，式 (9) で表される．

$$\mathbf{P}_c^T\mathbf{Q}_c\mathbf{P}_c = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_0 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{x_o}{z_o} \\ 0 & 1 & -\frac{y_o}{z_o} \\ -\frac{x_o}{z_o} & -\frac{y_o}{z_o} & \frac{x_o^2+y_o^2-r^2}{z_o^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_0 \end{pmatrix} = 0 \tag{8}$$

$$\mathbf{Q}_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{x_o}{z_o} \\ 0 & 1 & -\frac{y_o}{z_o} \\ -\frac{x_o}{z_o} & -\frac{y_o}{z_o} & \frac{x_o^2+y_o^2-r^2}{z_o^2} \end{pmatrix} \tag{9}$$

画像平面と円物体が存在する 3 次元平面はいずれも光学中心を原点としており，回転を行うことで座標系変換が行える．つまり傾斜楕円錐と傾斜円錐は同じ円錐の側面を共有しているため，点 $\mathbf{P}$ と点 $\mathbf{P_c}$ の間に任意の回転行列が存在する．Two Circle Algorithm ではこの性質を利用し，平面の法線ベクトルを一意に推定し，回転行列を求める．

2.2 Two Circle Algorithm によるカメラパラメータの推定

回転行列を $\mathbf{R_c}$ とすると，傾斜楕円錐と傾斜円錐は同じ円錐の側面を共有していることから，式 (10) が成り立つ．

$$\mathbf{P} = \mathbf{R}_c\mathbf{P}_c \tag{10}$$

式 (4), 式 (8), 式 (10) より式 (11) が成り立つ．

$$k\mathbf{R}_c^T\mathbf{Q}\mathbf{R}_c = \mathbf{Q}_c \tag{11}$$

$\mathbf{R_c}$ 及び $\mathbf{Q_c}$ を決定するためには，$\mathbf{Q}$ を特異値分解 (SVD) する必要がある．$\mathbf{Q}$ は 3×3 の対称行列であるため，特異値分解を行うと式 (12) になる．このとき $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ は各固有値，$\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$ はそれぞれ正規化を行った固有ベクトルを表す．

$$\mathbf{Q} = \mathbf{V}\Lambda\mathbf{V^T} \tag{12}$$

$$\begin{cases} \Lambda = diag\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} \\ \mathbf{V} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3) \end{cases} \tag{13}$$

式 (11) に式 (12) を代入すると式 (14) が得られる．また $\mathbf{R} = \mathbf{V^T}\mathbf{R_c}$ とし，$\mathbf{R}$ を式 (15) で表す．

$$k\mathbf{R}^T\Lambda\mathbf{R} = \mathbf{Q}_c \tag{14}$$

$$\mathbf{V}^T\mathbf{R}_c = \mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{1x} & r_{2x} & r_{3x} \\ r_{1y} & r_{2y} & r_{3y} \\ r_{1z} & r_{2z} & r_{3z} \end{pmatrix} \tag{15}$$

式 (14) を整理すると，式 (16) が得られる．

$$k\begin{pmatrix} r_{1x} & r_{2x} & r_{3x} \\ r_{1y} & r_{2y} & r_{3y} \\ r_{1z} & r_{2z} & r_{3z} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{1x} & r_{2x} & r_{3x} \\ r_{1y} & r_{2y} & r_{3y} \\ r_{1z} & r_{2z} & r_{3z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{x_o}{z_o} \\ 0 & 1 & -\frac{y_o}{z_o} \\ -\frac{x_o}{z_o} & -\frac{y_o}{z_o} & \frac{x_o^2+y_o^2-r^2}{z_o^2} \end{pmatrix}$$

より，

$$\begin{cases} \lambda_1(r_{1x}^2 - r_{2x}^2) + \lambda_2(r_{1y}^2 - r_{2y}^2) + \lambda_3(r_{1z}^2 - r_{2z}^2) = 0 \\ \lambda_1 r_{1x}r_{2x} + \lambda_2 r_{1y}r_{2y} + \lambda_3 r_{1z}r_{2z} = 0 \end{cases} \tag{16}$$

ここで，$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ は式 (17) と定義できる．

$$\begin{cases} \lambda_1\lambda_2 > 0 \\ \lambda_1\lambda_3 < 0 \\ |\lambda_1| \geq |\lambda_2| \end{cases} \tag{17}$$

固有ベクトルは互いに直交するため，$\mathbf{V}^T\mathbf{V} = \mathbf{I}$ である．また式 (15) で $\mathbf{R_c}$ は直交行列であるため $\mathbf{R}^T\mathbf{R} = \mathbf{R_c}^T\mathbf{R_c} = \mathbf{I}$ である．

S_1, S_2 はスケール係数で，符号が不定であることを示す．g, h を式 (18) としたとき，$\mathbf{R}^T\mathbf{R} = \mathbf{I}$ と式 (16) から式 (19) が得られる．

$$\begin{cases} g = \sqrt{\frac{\lambda_2-\lambda_3}{\lambda_1-\lambda_3}} \\ h = \sqrt{\frac{\lambda_1-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_3}} \end{cases} \tag{18}$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} g\cos\alpha & S_1 g\sin\alpha & S_2 h \\ \sin\alpha & -S_1\cos\alpha & 0 \\ S_1S_2h\cos\alpha & S_2h\sin\alpha & -S_1g \end{pmatrix} = \mathbf{V}^T\mathbf{R}_c \tag{19}$$

式 (14) に式 (19) を代入すると，式 (20) が得られる．

$$\begin{cases} k = \lambda_2 \\ \frac{x_0}{z_0} = -S_2\frac{\sqrt{(\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_2-\lambda_3)}\cos\alpha}{\lambda_2} \\ \frac{x_0}{z_0} = -S_1S_2\frac{\sqrt{(\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_2-\lambda_3)}\sin\alpha}{\lambda_2} \\ \frac{r^2}{z_0^2} = -\frac{\lambda_1\lambda_3}{\lambda_2^2} \end{cases} \tag{20}$$

3 次元平面の法線ベクトル $\mathbf{N}$ は回転行列 $\mathbf{R_c}$ による Z 軸方向の単位ベクトルの射影で表される．平面の法線ベクトル $\mathbf{N}$ とカメラ座標系における円の中心座標 $\mathbf{C}$ は式 (21) で表される．S_1, S_2, S_3 は符号不定を示す．

$$\begin{cases} z_0 = S_3\frac{\lambda_2 r}{\sqrt{|\lambda_1\lambda_3|}} \\ \mathbf{C} = \mathbf{R_c}\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = z_0\mathbf{V}\mathbf{R}\begin{pmatrix} \frac{x_0}{z_0} \\ \frac{y_0}{z_0} \\ 1 \end{pmatrix} = z_0\mathbf{V}\begin{pmatrix} S_2\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\sqrt{\frac{\lambda_1-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_3}} \\ 0 \\ -S_1\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\sqrt{\frac{\lambda_2-\lambda_3}{\lambda_1-\lambda_3}} \end{pmatrix} \\ \mathbf{N} = \mathbf{R_c}\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{V}\mathbf{R}\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{V}\begin{pmatrix} S_2\sqrt{\frac{\lambda_1-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_3}} \\ 0 \\ -S_1\sqrt{\frac{\lambda_2-\lambda_3}{\lambda_1-\lambda_3}} \end{pmatrix} \end{cases} \tag{21}$$

円物体の存在する 3 次元平面はカメラの向いている方向を選ぶと，法線ベクトル $\mathbf{N}$ 及び中心座標 $\mathbf{C}$ の Z 軸方向の符号を決定でき，式 (22) が得られる．

$$\begin{cases} \mathbf{N}\cdot\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T > 0 \\ \mathbf{C}\cdot\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T < 0 \end{cases} \tag{22}$$

式 (22) より S_1, S_3 の符号を決定することができる．これより S_2 のみ未定であるため，法線ベクトル $\mathbf{N}$ 及び中心座標 $\mathbf{C}$ それぞれに対して 2 組の解が得られる．

さらに，同一平面内にある 2 つの円物体が写った画像を用いてカメラの焦点距離を推定できる．焦点距離をある値とし，そのときの各円の法線ベクトル $N_1(f), N_2(f)$ を求め

ⓒ 2016 Information Processing Society of Japan

る．2 円が同一平面にある場合，各法線ベクトルは互いに平行であるので，式 (23) が得られる．したがって式 (24) に示すように，式 (23) を最小化する焦点距離 f_{min} 及びそのときの法線ベクトル $\mathbf{N}$ を推定値として決定する．

$$\mathbf{N}_1(f) \cdot \mathbf{N}_2(f) = 1 \tag{23}$$

$$(\mathbf{N}_1(f) \cdot \mathbf{N}_2(f) - 1)^2 \rightarrow \min . \tag{24}$$

また 2 つの円の中心座標も式 (21) によって推定できる．2 つの円の半径が未知である場合，式 (21) において z_0 を定めることはできない．$\mathbf{C_1}, \mathbf{C_2}$ をそれぞれの円の中心座標とすると，$\mathbf{C_1}, \mathbf{C_2}$ は式 (25) で表される．$\mathbf{C_{10}}, \mathbf{C_{20}}$ は検出した楕円のパラメータから算出される．

$$\begin{cases} \mathbf{C}_1 = z_0 \mathbf{C}_{10} \\ \mathbf{C}_2 = z_0 \mathbf{C}_{20} \end{cases} \tag{25}$$

また，2 つの円の中心間の距離 d_{12} は式 (26) で表される．

$$d_{12} = |\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_2| = |z_0||\mathbf{C}_{10} - \mathbf{C}_{20}| \tag{26}$$

2 つの円の中心及び円が存在する平面の法線ベクトルを基準としてワールド座標系 $\mathbf{O} - \mathbf{XYZ}$ を定義する．ここで片方の円の中心 $\mathbf{C_1}$ を原点，法線ベクトル $\mathbf{N}$ を Z 軸及びベクトル $\mathbf{C_2} - \mathbf{C_1}$ を X 軸とする．このとき原点 O 及び X, Y, Z 軸の単位ベクトル $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 軸は式 (27) で表される．

$$\begin{cases} \mathbf{O} = \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{i} = \frac{\mathbf{C}_{20} - \mathbf{C}_{10}}{|\mathbf{C}_{20} - \mathbf{C}_{10}|} \\ \mathbf{j} = \mathbf{k} \times \mathbf{i} \\ \mathbf{k} = \mathbf{N} \end{cases} \tag{27}$$

仮に 2 つの円のうちどちらかの半径，2 つの円の中心間の距離，光学中心と円が存在する平面との距離のいずれかが既知である場合，z_0 は式 (21) または式 (26) によって算出できる．したがって円の中心の座標，円の半径及びカメラ座標系の原点（光学中心）を決定できる．

2.3 Two Circle Algorithm の問題点

Two Circle Algorithm によるカメラパラメータの推定精度は，その特性上楕円パラメータの推定精度に依存する．しかし実画像の円には厚みや模様があり，複数平面の物体を含むため，余分なエッジ部分が多い．そのため楕円パラメータの推定精度が落ち，カメラパラメータの推定に大きな誤差が生じるので，実画像に応用することが困難であった．

本論文では，目標円物体が写った画像を用いて，次章で提案する手法により目標円物体を検出し，外部パラメータを推定する．

3. 提案手法

本章では，まず楕円フィティングの精度を向上させるために，広角度範囲の RANSAC による楕円フィティングを提案する．次に，目標円物体が写った画像を利用し，制約条件を定義することによって適切な楕円ペアを選出する手法を提案する．

3.1 楕円フィティング

楕円フィティングとは，画像上のエッジ点から楕円パラメータを推定する手法である．2 章で述べたように，画像上の楕円は式 (1) で表される．係数 $A = 1$ となるように両辺を割ると楕円は式 (28) で表すことができる．

$$x_e^2 + A' x_e y_e + B' y_e^2 + C' x_e + D' y_e + E' = 0 \tag{28}$$

式 (28) より，最低 5 つの点が与えられたとき，連立方程式を解くことによりパラメータ A', B', C', D', E' を求めることができる．また，6 点以上の点が与えられたとき，最小二乗法によりパラメータを求める．

3.2 RANSAC を用いた楕円フィティング

RANSAC(Random Sample Consensus) とは，ランダムに幾つかのサンプルを選択し，投票を行うことでパラメータを推定する手法である．本研究では任意の角度ごとに，画像上のエッジ点を分割する．分割された角度ごとに RANSAC を適用し，複数のエッジ点をランダムに選択することで，最小 2 乗法により楕円パラメータを推定する．

3.2.1 格子点によるエッジ点の領域分割

完全にランダムな点を抽出してすべての組み合わせを試行するのは計算量が膨大となり不可能である．また，抽出するエッジ点が狭い角度の範囲内に集中すると，その楕円の正しいパラメータを求められない可能性が高い．さらに実画像の中に写っている楕円には，中心と短軸長軸の情報がないので，抽出するエッジ点の位置に偏りが少ないことが望ましい．そこで図 2 のように格子状に仮の楕円中心点を配置し，図 3 のように，360 度を N 分割し，各楕円中心点から分割した角度ごとにエッジの点群を格納する．角度ごとにエッジ点を分割することにより，明らかに楕円を構成できない点群は省くことができる．

図 3 により分割された各領域からランダムにエッジ点を抽出し，楕円フィッティングにより楕円を構成する．構成された楕円上にエッジ点が存在する比率を求め，比率が閾値 (Threshold) 以上であった場合に推定された楕円パラメータとする．また，円には厚みや模様があるため，同じ座標においても違う楕円パラメータが検出される可能性が

図 2 格子状に点を配置した画像

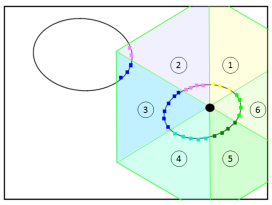


図 3 角度による領域分割のイメージ (N=6)

ある．そこで各格子点ごとに最も比率が高かった楕円とはパラメータが一定以上異なる楕円を別の楕円として検出し保存した．図 4 において，1 つの格子点から 2 つ以上の楕円が検出された場合色分けを行っている．また楕円のパラメータによる色分けのフローチャートを図 6 に示す．

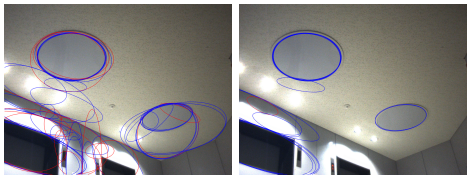


図 4 閾値による楕円の選定 (左:Threshold=40 , 右:Threshold=70)

図 7 から，実画像から得られた楕円パラメータには円物体とは少し離れたものや，関係ないものも多数含まれていることが分かる．正しいカメラパラメータを求めるためには，まず正しい楕円輪郭のペアを選択する必要がある．

3.2.2 K-means clustering による楕円の領域分割

K-means clustering[8] は与えられたデータを k 個のクラスタに分割する領域分割の手法である．楕円フィティングを行い，Two Circle Algorithm に適用するためには，2 つの楕円パラメータが必要である．推定された楕円パラメータがどちらの円に属しているかを判別するため，K-means clustering を用いる．楕円フィッティングにより求められた楕円の中心座標によりクラスタリングを行い，2 つのグループに分割する．

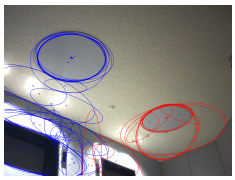


図 5 図 4 に K-means clustering を適用した画像 (Threshold=40)

図 5 により色分けされた楕円群からそれぞれ楕円パラメータを 1 つ選出し，2 章で述べた Two Circle Algorithm により法線ベクトルを一意に推定し，そのときのカメラパラメータを求める．すべての楕円ペアに対し同様の計算を行う．

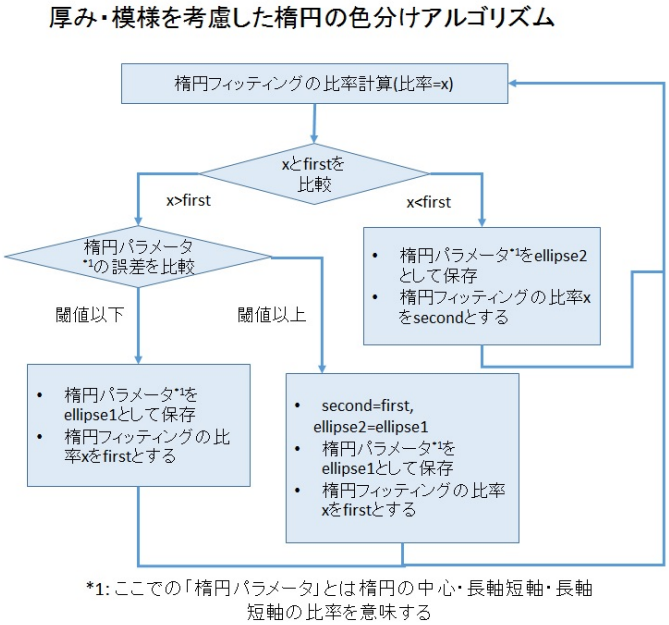


図 6 厚み・模様を考慮した楕円の色分け部分のフローチャート

3.3 制約条件による楕円パラメータの選定

ここまで，同一平面内の 2 円が写った実画像から楕円フィッティングを行い，楕円パラメータを推定する方法を述べた．本節では，それぞれの楕円ペアにより推定された法線ベクトル及び焦点距離，カメラの光学中心から円平面までの距離を用いて，同一平面内にある 2 円の楕円パラメータを選出する方法を述べる．適切なペアを選出するために，3 つの制約条件を考案する．これらの制約条件により定義した評価関数を用いて選定を行う．

3.3.1 法線ベクトルのなす角度による制約条件

2.2 章で述べたように，平行平面内にある物体の平面に対する法線ベクトルは互いに平行である．そこで式 (23) により，すべての楕円ペアに対して法線ベクトルの内積を計算する．内積の値は [-1,1] の区間に存在するため，値が小さく判別しにくい．そのため実際には，内積の定義式を用いてなす角度 θ(度) の大きさにより判別を行う．これを制約条件 1 とする．ある楕円ペア (i,j) に対して，なす角度を $\theta(i,j)$，それぞれの法線ベクトルを $N_i(f), N_j(f)$ とする．このときなす角度 $\theta(i,j)$ は式 (29) で表される．

$$\theta(i,j) = \cos^{-1}\frac{N_i(f)\cdot N_j(f)}{|N_i(f)||N_j(f)|}\frac{180}{\pi} \tag{29}$$

法線ベクトルが互いに平行であるためには，なす角度が小さければよい．そこでなす角度 θ の大きさが小さい順にソートを行い，その順位を $n_t(i,j)$ とする．

3.3.2 カメラの光学中心 O からの距離による制約条件

2.2 章の式 (21) おいて各円の半径を r_1, r_2 とし，ある楕円ペア (i,j) の各固有値を $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \lambda_{i3}$ 及び $\lambda_{j1}, \lambda_{j2}, \lambda_{j3}$ と

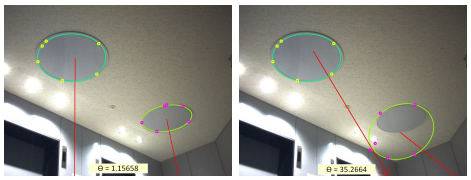


図 7 法線ベクトルのなす角度 θ(度) による比較

すると，2 円のカメラの光学中心 O からの距離 z_i 及び z_j は式 (30) で表される．S_{13}, S_{23} はスケール係数である．

$$z_i = S_{13}\frac{\lambda_{i2}r_1}{\sqrt{|\lambda_{i1}\lambda_{i3}|}}\ ,\ z_j = S_{23}\frac{\lambda_{j2}r_2}{\sqrt{|\lambda_{j1}\lambda_{j3}|}} \tag{30}$$

本研究では 2 つの円物体は半径が同一であると仮定しているので，$r_1 = r_2$ である．さらに 2 円が同一平面内にある場合，カメラの光学中心から円が存在する平面までの距離は等しくなる．このことから理想状態である場合式 (31) が得られる．ある楕円ペア (i, j) に対して，式 (31) の誤差を $z_{diff}(i, j)$ とし，すべての楕円ペアで比較する．これを制約条件 2 とし，式 (32) で定義する．光学中心からの距離の誤差 $z_{diff}(i, j)$ の大きさが小さい順にソートを行い，その順位を $n_z(i, j)$ とする．

$$\frac{\lambda_{i2}}{\sqrt{|\lambda_{i1}\lambda_{i3}|}} = \frac{\lambda_{j2}}{\sqrt{|\lambda_{j1}\lambda_{j3}|}} \tag{31}$$

$$z_{diff}(i, j) = (\frac{\lambda_{i2}}{\sqrt{|\lambda_{i1}\lambda_{i3}|}} - \frac{\lambda_{j2}}{\sqrt{|\lambda_{j1}\lambda_{j3}|}})^2 \tag{32}$$

3.3.3 焦点距離の誤差による制約条件

カメラキャリブレーションにより外部パラメータを推定する際，焦点距離の真値との誤差が少ないほど正しく推定ができる．そこであらかじめ測定した真値の焦点距離 f_{true} と推定された焦点距離 $f(i, j)$ との誤差を $f_{diff}(i, j)$ とし，すべての楕円ペアで比較する．これを制約条件 3 とし，式 (33) で定義する．また焦点距離の誤差 $f_{diff}(i, j)$ の大きさが小さい順にソートを行い，その順位を $n_f(i, j)$ とする．

$$f_{diff}(i, j) = [f(i, j) - f_{true}]^2 \tag{33}$$

$n_t(i, j), n_z(i, j), n_f(i, j)$ の合計値を評価関数 $n(i, j)$ とする．$n(i, j)$ が最も小さい楕円ペア (i, j) を選出し，そのときの楕円パラメータを用いてカメラの回転行列 $\mathbf{R}$ を求める．

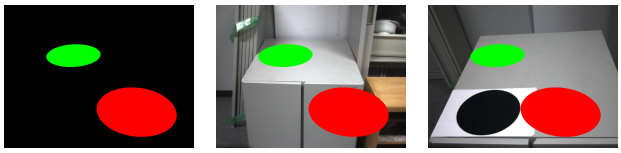
$$n_t(i, j) + n_z(i, j) + n_f(i, j) = n(i, j) \rightarrow \min. \tag{34}$$

4. 実験

4.1 シミュレーション画像による実験

実画像を用いる前に，焦点距離が既知であるシミュレーション画像を用いて実験を行った．今回画像サイズが 800×600，焦点距離 $f = 800$ 画素であるシミュレーション画像を使用した．

提案手法による外部パラメータの推定値が正しいかを確認するために，単純背景のシミュレーション画像 (A)，複雑な背景を合成したシミュレーション画像 (B)，他平面に円物体を含むシミュレーション画像 (C) を用いて比較を行った．実験に用いた画像セットを図 8 に示し，このとき真値の回転行列 $\mathbf{R}$ を式 (35) に pan 角,tilt 角,roll 角を式 (36) に示す．



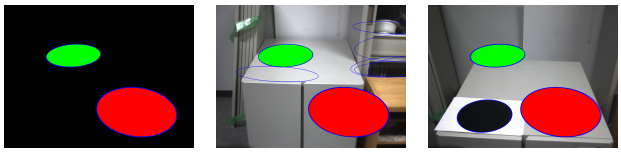
(A) (B) (C)

図 8 実験に用いた画像セット 1

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.866 & 0 \\ 0.433 & -0.25 & 0.866 \\ 0.75 & -0.433 & -0.5 \end{pmatrix} \tag{35}$$

$$\begin{cases} pan = 30^\circ \\ tilt = 30^\circ \\ roll = 0^\circ \end{cases} \tag{36}$$

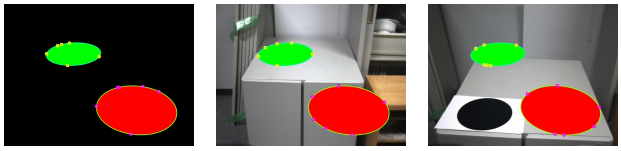
図 8 における各画像の楕円フィッティングの結果を図 9 に示す．ここで 3 章における閾値 Threshold の値は 70 とした．



(A) (B) (C)

図 9 楕円フィッティングの結果 (Threshold=70%)

さらに 3 章で示した 3 つの制約条件により楕円ペアを選択した結果を図 10 に示す．楕円上の点はフィッティングされた楕円を求める際に用いられたエッジ点を示す．



(A) (B) (C)

図 10 楕円ペアの選出

RANSAC による楕円フィッティングによって求められたカメラパラメータは，同じ条件下によって同様の結果を得られるわけではない．そこで同条件下での実験を 3 回行い，推定された回転行列 $\mathbf{R}$ を表 (1) に示す．

図 10 において，同一平面内の楕円ペアが正しく選出さ

表 1 提案手法により推定された回転行列 **R**

	1 回目	2 回目	3 回目
図 8(A)	$\begin{pmatrix} 0.493 & 0.870 & 0.013 \\ 0.428 & -0.255 & 0.867 \\ 0.758 & -0.422 & -0.498 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.494 & 0.87 & 0.014 \\ 0.426 & -0.256 & 0.868 \\ 0.758 & -0.423 & -0.497 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.504 & 0.863 & 0.019 \\ 0.427 & -0.268 & 0.864 \\ 0.75 & -0.428 & -0.504 \end{pmatrix}$
図 8(B)	$\begin{pmatrix} 0.502 & 0.865 & 0.0003 \\ 0.43 & -0.25 & 0.867 \\ 0.75 & -0.435 & -0.498 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.497 & 0.868 & 0.0035 \\ 0.426 & -0.248 & 0.87 \\ 0.756 & -0.431 & -0.493 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.498 & 0.867 & -0.0075 \\ 0.433 & -0.241 & 0.869 \\ 0.752 & -0.436 & -0.495 \end{pmatrix}$
図 8(C)	$\begin{pmatrix} 0.502 & 0.865 & -0.0023 \\ 0.437 & -0.252 & 0.864 \\ 0.746 & -0.435 & -0.504 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.505 & 0.863 & -0.0042 \\ 0.436 & -0.251 & 0.864 \\ 0.745 & -0.438 & -0.503 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.496 & 0.868 & 0.0066 \\ 0.43 & -0.252 & 0.867 \\ 0.754 & -0.427 & -0.499 \end{pmatrix}$

表 2 pan,tilt,roll 角の推定誤差 (度)

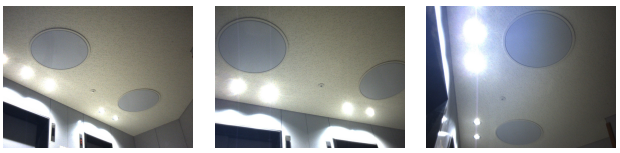
	1 回目	2 回目	3 回目
図 8(A)	pan =0.90 tilt=0.11 roll=-0.83	pan =0.87 tilt=0.23 roll=-0.91	pan =0.34 tilt=-0.25 roll=-1.23
図 8(B)	pan =-0.11 tilt=0.16 roll=0.00	pan =0.29 tilt=0.46 roll=-0.22	pan =-0.11 tilt=0.33 roll=-0.50
図 8(C)	pan =-0.24 tilt=-0.26 roll=-0.14	pan =-0.47 tilt=-0.22 roll=-0.29	pan =0.49 tilt=0.10 roll=-0.43

れているため，表 (1) からも分かるように複雑な背景を合成した画像においても回転行列の推定値は変わらない．また，推定された回転行列の真値との誤差は非常に小さいため，正しくパラメータを推定できている．したがって複雑な背景を含む画像においても正しく外部パラメータを推定することができる．また，表 (2) で示すように，単純背景と複雑な背景において推定された pan 角,tilt 角,roll 角に大きな差は無く，真値との誤差も小さいことが確認できる．

4.2 実画像による実験

4.1 節により，提案手法の有効性を示した．本節では実画像を用いて，同一平面内にある半径が同一である円物体の検出を行う．

お掃除ロボットにカメラを搭載することを想定し，天井や壁といった視線が低い画像を用いて実験を行った．実験にはすべて焦点距離 $f = 1293$ 画素，画像サイズ 1024×768 である画像を用いた．実験に用いた画像セットを図 11 に示す．カメラの位置を固定し，シミュレーション画像での実験と同様に 3 枚の画像セットを用意し，それぞれについて実験を行った．



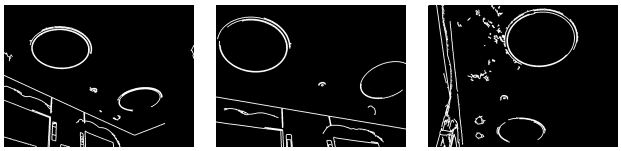
(A) (B) (C)

図 11 実験に用いた画像セット 2

このとき canny 関数により取得したエッジ画像を図 12 で示し，提案手法による楕円フィッティングの結果を図 13 に示す．ここで Threshold の値は 60 とした．

3 つの制約条件により楕円ペアを選択した結果を図 14 で示す．図 14 より，背景が異なる場合でも正しい楕円ペアを選出できていることが確認できる．

実画像の実験においても，シミュレーション画像を用いた実験と同様に，同じ条件で 3 回の実験を行った．そのとき推定された pan 角,tilt 角,roll 角を表 (3) に示す．



(A) (B) (C)

図 12 画像セット 2 におけるエッジ画像

(A) (B) (C)

図 13 画像セット 2 における楕円フィッティングの結果 (Threshold=60%)

(A) (B) (C)

図 14 画像セット 2 における楕円ペアの選出

表 3 pan,tilt,roll 角の推定値 (度)

	1 回目	2 回目	3 回目
図 8(A)	pan =140.87 tilt=36.79 roll=175.56	pan =139.49 tilt=37.91 roll=174.34	pan =140.12 tilt=37.41 roll=175.79
図 8(B)	pan =119.18 tilt=43.63 roll=171.43	pan =120.87 tilt=45.66 roll=170.09	pan =121.39 tilt=43.89 roll=169.97
図 8(C)	pan =169.64 tilt=46.79 roll=179.87	pan =174.05 tilt=45.60 roll=178.15	pan =171.18 tilt=45.90 roll=177.79

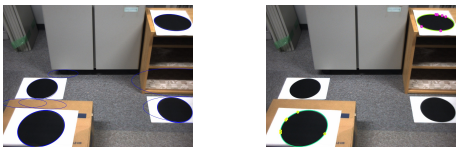
表 (3) から，背景が異なる場合においても pan 角,tilt 角,roll 角の推定値に大きな差は無いことが確認できる．したがって，天井や壁といった，お掃除ロボットにカメラを搭載した際に撮影されると想定される画像においても，正しく安定にカメラパラメータを推定することができた．

4.3 提案手法の問題点

提案手法では，楕円フィッティングにより推定された楕円パラメータ群の中に，正しい楕円パラメータが含まれていることを前提としている．そのため楕円フィッティングによるパラメータの推定誤差が大きいと，正しい楕円ペアは選出されない．また，Two Circle Algorithm は楕円パラメータによってカメラパラメータを推定する．その性質上，似た楕円パラメータが多く存在するとき，図 15 に示すように同一平面内に存在しない楕円ペアを選出する場合がある．

さらに本研究では K-means clustering を用いて，楕円の中心座標により楕円パラメータを 2 つに分割している．そのため図 16 のように，同一平面内にある円物体が画像のど

ⓒ 2016 Information Processing Society of Japan



(A) (B)

図 15 左:楕円フィッティングの結果，右:楕円ペアの選出結果

こかに偏っている場合，正しい楕円ペアを選出できない．

(A) (B)

図 16 左:K-means clustering の結果，右:楕円ペアの選出結果

5. まとめ

本研究では，Two Circle Algorithm を実画像に適用するために，まず領域分割を用いた広角度範囲の RANSAC による楕円フィティングを提案した．角度ごとにエッジ点をランダムに選択し，楕円フィッティングを行うことで，複雑な背景，厚みや模様のある円物体においても複数の楕円パラメータを推定することができた．次に同一平面内にある 2 円の楕円パラメータを選出するために，3 つの制約条件を定義し，評価を行った．すべての楕円ペアに対し，制約条件により評価を行うことで，同一平面内にある 2 円の楕円パラメータを正しく選出できた．

4 章において，まずシミュレーション画像を用いて実験を行い，求められた回転行列，pan 角,tilt 角,roll 角の真値との誤差を比較することで，提案手法の有効性を示した．次に実画像を用いて実験を行い，同一平面内の 2 つの楕円ペアが正しく選出されていることを示した．また検出したい円物体以外の物体を含む複雑な背景の画像，複数の平面に円物体が存在する画像においても正しい楕円ペアが選出されることを示した．

今後の課題として，本手法では検出された楕円ペアごとに外部パラメータを推定しているために処理コストが高い．そのため，閾値 (Threshold) を設けることで，楕円の候補数を制限している．しかし実験セットにより，閾値を変えなければならず，汎用性に欠ける．そこで，背景や前景の変化に頑健な楕円ペアの検出方法を検討する必要がある．

参考文献

[1] : iRobot ロボット掃除機ルンバ 公式サイト，`https://www.irobot-jp.com/`.

[2] Kim, J.-S. and Kweon, I.-S.: Camera calibration using projective invariance of concentric circles, *Proceedings of Workshop on Image Processing and Image Understanding (IPIU)* (2001).

[3] Kim, J.-S., Kim, H.-W. and Kweon, I. S.: A camera calibration method using concentric circles for vision applications, *ACCV2002, Melbourne, Australia* (2002).

[4] Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration, *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334 (2000).

[5] Chen, Q., Wu, H. and Wada, T.: Camera calibration with two arbitrary coplanar circles, *Computer Vision-ECCV 2004*, Springer, pp. 521–532 (2004).

[6] 岩元祐輝，Rangarajan, P.，金谷健一：楕円当てはめの超精度最小二乗法，情報処理学会研究報告，pp. 2009–9 (2009).

[7] 島田喜明，和田俊和ほか：特徴点の属性と空間的配置を統合した密な画像間対応付け，画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011) 論文集， Vol. 2011, pp. 1272–1278 (2011).

[8] Gao, J., Kim, S. J. and Brown, M. S.: Constructing image panoramas using dual-homography warping, *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on*, IEEE, pp. 49–56 (2011).

ⓒ 2016 Information Processing Society of Japan